

УДК: 536.24: 621.396: 621.362

Тепловые процессы в электронных системах в условиях влияния эффекта тепловой обратной связи

А. Г. Мадера

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
e-mail: agtprof@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2018

Рассматривается эффект тепловой обратной связи, возникающий в электронных системах (интегральных микросхемах, резисторах, электрорадиоэлементах) в процессе своего функционирования. Тепловая обратная связь возникает во всех электронных системах, у которых эксплуатационные параметры и мощности потребления зависят от температуры саморазогрева, а температура, в свою очередь, – от потребляемых мощностей. Возникающее при этом интерактивное взаимовлияние параметров функционального и теплового режимов электронной системы между собой, возвращающее новые значения параметров по цепи обратной связи, и приводит к тепловой обратной связи. Тепловая обратная связь может быть как положительной, когда мощность потребления элементов электронной системы увеличивается с ростом температуры, так и отрицательной, когда мощность потребления падает с ростом температуры. Воздействие эффекта тепловой обратной связи проявляется в любых электронных системах и может оказывать значительное влияние на их работоспособность и надежность и являться серьезным препятствием на пути создания конкурентоспособных электронных систем. В то время как положительная тепловая обратная связь может приводить к выходу эксплуатационных параметров системы за пределы допустимых значений, сбоям, выгоранию, то отрицательная тепловая обратная связь, напротив, оказывает стабилизирующее воздействие на функциональный и тепловой режимы системы. В статье рассматривается сущность тепловой обратной связи и оказываемое ею влияние на тепловые процессы в электронных системах. Предлагается метод моделирования тепловой обратной связи, который заключается во введении в тепловую модель системы новых схемных температурно-зависимых элементов. Такая модель тепловой обратной связи позволяет без труда включать ее в существующие алгоритмы и эффективные программные комплексы теплового проектирования электронных систем. Применение разработанной модели рассмотрено на примере реальной электронной системы, показано влияние тепловой обратной связи на тепловые процессы, развивающиеся в ее элементах.

Ключевые слова: электронная система, микросхема, тепловая обратная связь, температурное распределение, тепловая модель, математическая модель, моделирование.

Введение

Тепловая обратная связь возникает в полупроводниковых интегральных микросхемах и электронных системах, построенных с их применением, в силу значительной зависимости электрических и физических параметров полупроводникового кристалла микросхемы от температуры [1–6]. Эффект тепловой обратной свя-

зи [1, 3, 5–9] заключается в том, что в процессе своего функционирования потребляемая микросхемой мощность приводит к саморазогреву, а ввиду зависимости физических параметров полупроводникового кристалла от температуры, – к изменению (увеличению или убыванию) мощности потребления, которая снова изменяет температурное распределение в микросхеме, приводя к новому изменению потребляемой мощ-

ности, замыкая тем самым петлю обратной связи. Рассмотренная обратная связь называется тепловой обратной связью (рис. 1): потребляемая микросхемой мощность ($P_{\text{потр}}$) приводит к возникновению температурного распределения на кристалле $T_j(P_{\text{потр}})$, а распределение температуры, в свою очередь, – к изменению мощности потребления микросхемы в соответствии с ее температурной зависимостью $P(T_j)$. Тепловая обратная связь может быть как положительной – потребляемая мощность увеличивается с ростом температуры микросхемы, так и отрицательной – потребляемая мощность уменьшается с ростом температуры микросхемы.

Воздействие тепловой обратной связи на электрический и тепловой режимы микросхем и электронных систем приводит к таким нежелательным последствиям, как выход электрических (статических и динамических) параметров за пределы допустимых значений, снижение надежности, нарушение работоспособности, уменьшение помехоустойчивости, повышенные уровни температуры и др. Воздействие тепловой обратной связи при функционировании микросхем и электронных систем в большей или меньшей степени присутствует всегда и неустранимо, хотя и может быть в ряде случаев снижено, например, за счет применения более эффективных способов охлаждения, микросхем с меньшим энергопотреблением или с отрицательной тепловой обратной связью. Хотя обратная связь оказывает значительное влияние на функциональные характеристики и работоспособность микросхем и электронных систем, тем не менее, их проектирование в большинстве случаев проводится без учета эффекта тепловой обратной связи, что приводит к ошибкам проектирования и созданию неконкурентоспособных микросхем и электронных систем.

В данной статье предлагается метод моделирования воздействия тепловой обратной связи на тепловые процессы в электронных системах. Метод моделирования тепловой обратной связи основан на введении в тепловую модель электронных систем новых схемных элементов, представляющих собой термозависимые тепловые проводимости, несущие в себе информацию о зависимости мощностей потребления элементов электронных систем от температуры. Такой подход позволяет включать описание нового схемного элемента как в обобщенное мат-

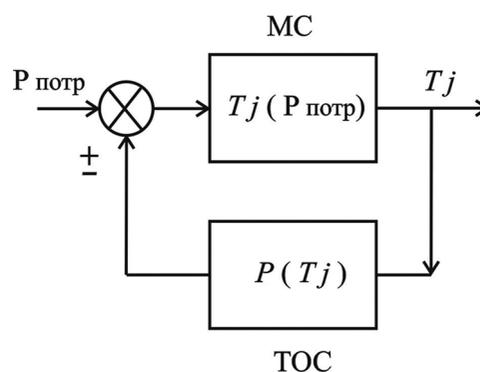


Рис. 1. Схематическое изображение тепловой обратной связи

рично-топологическое уравнение, описывающее тепловые процессы в сложных электронных системах [2, 10, 11], так и в существующие эффективные программные комплексы теплового проектирования [11]. Применение разработанного метода моделирования тепловой обратной связи рассматривается на примере электронной системы, представляющей собой электронный модуль с микросхемами в корпусах, припаянных своими выводами к многослойной печатной плате (МПП).

Тепловая и математическая модели, учитывающие воздействие тепловой обратной связи

Электронная система содержит множество N электронных компонентов (микросхем и электрорадиоэлементов), элементов конструкции (крепления, монтажа), теплоотводы, систему охлаждения, находящихся в тепловом взаимодействии между собой и потоками жидкостной (воздушной) среды как внутри, так и снаружи электронной системы. Тепловое моделирование электронной системы основано на эквивалентной электротепловой модели, которая представляет собой систему N изотермических тел [2, 7]. Одна часть элементов тепловой модели моделирует электронные компоненты, потребляющие энергию от внешних источников электропитания и одновременно рассеивающие тепловую энергию (активные элементы), другая – моделирует компоненты, электрическую энергию не потребляющие, но только рассеивающие тепловую энергию (пассивные элементы). Все элементы тепловой модели (активные и пассивные) находятся в тепловом взаимодействии посредством кондуктивного, конвективного и лучистого теп-

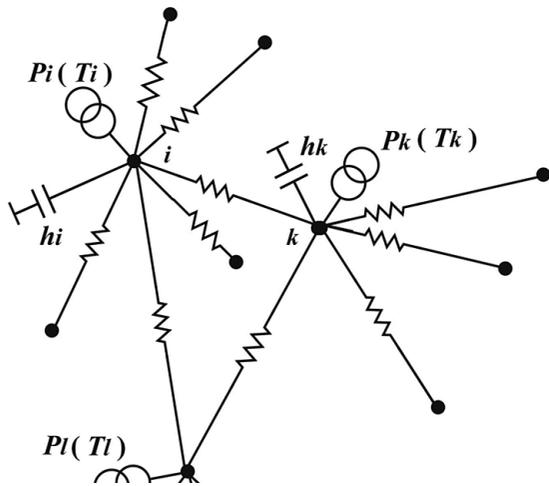


Рис. 2. Тепловая модель электронной системы (фрагмент)

лообмена между собой и жидкостной (воздушной) средой внутри и вне электронной системы.

Фрагмент тепловой модели электронной системы приведен на рис. 2. Тепловая модель электронной системы [2, 12] строится путем дискретизации электронной системы на отдельные элементы, относительно которых с достаточной для инженерной практики точностью можно принять изотермическое распределение температуры в элементах. В большинстве практических случаев можно считать, что распределение температуры жидкости (воздуха) внутри корпуса электронной системы мало отличается от изотермического, поэтому ее усредненная температура включается в тепловую модель в виде изотермического тела с узлом, температура которого определяется наряду с температурами остальных элементов электронной системы. Элементы тепловой модели (электронной системы) моделируются следующими схемными элементами (см. рис. 2): потребляющими электроэнергию активными элементами – источниками теплоты $P_i(T_i)$, подключенными к узлу i , которые в условиях воздействия тепловой обратной связи являются температурозависимыми; пассивными элементами – тепловыми проводимостями $g_L (= g_{ik})$ в ветви L , соединяющей узлы i и k . Температура окружающей среды и потока жидкости, поступающей внутрь корпуса электронной системы моделируется заданными потенциалами в узлах тепловой модели; объемные теплоемкости элементов – емкостями $h_i = \rho_i c_i V_i$, где ρ_i , c_i , V_i – плотность, удельная теплоемкость и объем i -го элемента соответственно; температуры элементов T_i – потенциалами в узлах; потоки тепло-

ты J_i между двумя взаимодействующими элементами i и k – токами в ветвях, соединяющими узлы i и k .

Обобщенная матрично-топологическая математическая модель [2] нестационарных температур $T_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N+1$ в узлах тепловой модели (узел $N+1$ соответствует температуре жидкости внутри корпуса электронной системы), которая в условиях воздействия тепловой обратной связи содержит температурозависимый вектор мощностей $P(T, t)$ активных элементов электронной системы, имеет вид:

$$H \frac{dT(t)}{dt} + AG(T)A^T T(t) = P(T, t) + AG(T)T_a(t) \quad (1)$$

$$T(0) = T_a(0),$$

где $T(t) = (T_1(t), T_2(t), \dots, T_{N+1}(t))^T$ – $(N+1)$ -вектор температур в узлах тепловой модели; $A = (N+1) \times (M+1)$ -матрица инцидентий графа тепловой модели (ветвь M моделирует теплообмен оболочки с окружающей средой, ветвь $M+1$ – тепловой поток, переносимый жидкостью, поступающей внутрь корпуса электронной системы); $G(T) = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_{M+1})$ – диагональная $(M+1) \times (M+1)$ -матрица проводимостей ветвей g_k , $k = 1, 2, \dots, M+1$; $H = \text{diag}(h_1, h_2, \dots, h_{N+1})$ – диагональная $(N+1) \times (N+1)$ -матрица полных объемных теплоемкостей $h_i = \rho_i c_i V_i$, элементов тепловой модели; $P(T, t) = (P_1(T_1, t), P_2(T_2, t), \dots, P_{N-1}(T_{N-1}, t), 0, 0)^T$ – $(N+1)$ -вектор температурозависимых источников теплоты (мощностей потребления) $P(T, t)$ активных элементов электронной системы; $T(0) = (T_1(0), T_2(0), \dots, T_{N+1}(0))^T$ – $(N+1)$ -вектор известных начальных температур в узлах тепловой модели; $T_a(t) = (0, 0, \dots, T_e(t), T_{a,in}(t))^T$ – $(M+1)$ -вектор известных температур окружающей среды $T_e(t)$ вне оболочки электронной системы и жидкостного потока $T_{a,in}(t)$ на входе в электронную систему; $T(0) = (T_1(0), T_2(0), \dots, T_{N+1}(0))^T$ – $(N+1)$ -вектор начальных температур элементов тепловой модели, равных температуре среды в начальный момент времени $t=0$, $T(0) = T_a(0)$; $(\cdot)^T$ – операция транспонирования.

Для моделирования влияния тепловой обратной связи на тепловые процессы в микросхемах и в электронной системе и обеспечения при этом возможности включения в существующие алгоритмы и программные комплексы теплового проектирования, разработан модельный схемный элемент, подключаемый к каждому активному элементу тепловой модели (рис. 3). Действитель-

но, зависимость потребляемой мощности (i -го элемента) $P_i(T_i)$ от температуры можно представить как $P_i(T_i) = P_i(T_0) \pm F_i(T_i)$, где $P_i(T_0)$ – мощность тепловыделения i -го компонента электронной системы при температуре T_0 , равной обычно 273 К или 293 К; $F_i(T_i)$ – функция от температуры, такая что $F_i(T_0) = 0$; знаки (+) или (–) в зависимости $P_i(T_i)$ соответствуют положительной или отрицательной тепловой обратной связи. Отметим, что зависимость мощности потребления электронного компонента от температуры могут быть получены теоретически или экспериментально [3, 6].

На рис. 3 приведен фрагмент тепловой модели с включенными в нее новыми схемными элементами тепловой обратной связи (I, K, L на рис. 3 являются номерами ветвей с элементами тепловой обратной связи $G_I(T_i), G_L(T_l), G_K(T_k)$). Зависимость потребляемой мощности $P_i(T_i)$ может быть выражена в виде $P_i(T_i) = P_i(T_{i0}) \pm G_K(T_i) T_i$ с температурно-зависимой тепловой проводимостью $G_K(T_i) = F_i(T_i)/T_i, T_i > 0$. Тепловая проводимость $G_K(T_i)$ может быть представлена на графе тепловой модели в виде нового схемного элемента величиной $G_K(T_k)$, подключенного к узлу k (см. рис. 2 и 3) и моделирующего тепловую обратную связь, причем знак тепловой проводимости $G_K(T_k)$ соответствует знаку обратной связи (положительной или отрицательной). Потребляемая при температуре T_0 мощность $P_k(T_0)$ элемента k на тепловой модели моделируется схемным элементом в виде независимого источника тепла с постоянной величиной мощности $P_{k0} = P_k(T_0)$. По умолчанию тепловой поток в ветви K с новым схемным элементом тепловой обратной связи направлен от узла k к узлу с нулевой температурой для отрицательной обратной связи, при этом $G_K(T_k) > 0$, и направлен в обратную сторону к узлу k для положительной обратной связи, причем $G_K(T_k) < 0$. Количество элементов тепловой обратной связи равно количеству активных элементов в электронной системе, в которых необходимо моделировать воздействие обратной связи, причем размерности матрицы $G(T)$, матрицы инцидентий A и вектора $T_a(T)$ увеличиваются на количество вводимых в граф тепловой модели новых модельных элементов, что, вместе с тем, не приводит к усложнению алгоритма автоматизированного компьютерного формирования уравнений (1).

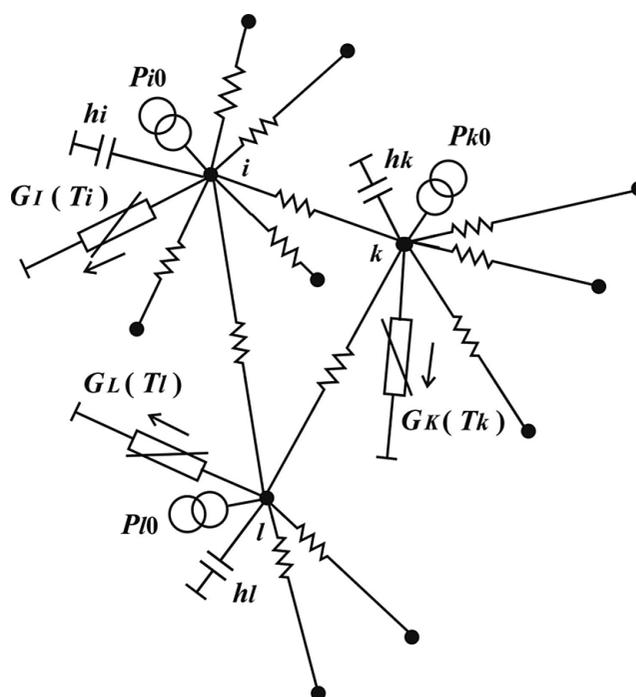


Рис. 3. Тепловая модель (фрагмент) электронной системы, моделирующая воздействие тепловой обратной связи посредством подключения схемных элементов тепловой обратной связи в виде температурозависимых тепловых проводимостей $G_I(T_i), G_L(T_l), G_K(T_k)$

Пример моделирования тепловой обратной связи

Применение разработанных методов моделей тепловой обратной связи рассмотрим на примере электронной системы (рис. 4, а), представляющей собой электронный модуль (ЭМ), содержащий две микросхемы (IC1 и IC2 на рис. 4, а), заключенные в корпуса и припаянные своими выводами к многослойной печатной плате (РСВ на рис. 4, а). С поверхностей электронного модуля происходит теплообмен с окружающей средой (Ambient на рис. 4, а). Тепловые процессы, протекающие в рассматриваемом электронном модуле, подвержены воздействию тепловой обратной связи, а именно: потребляемые микросхемами IC1 и IC2 мощности $P_1(T_{j1})$ и $P_2(T_{j2})$ приводят как к саморазогреву собственно микросхем, так и их взаимному подогреву посредством теплового взаимодействия через растекание тепловых потоков по печатной плате; возникающие при этом распределения температуры изменяют мощности микросхем согласно их температурным зависимостям и приводят к новым температурным распределениям, замыкая тем самым петлю обратной связи (см. рис. 1).

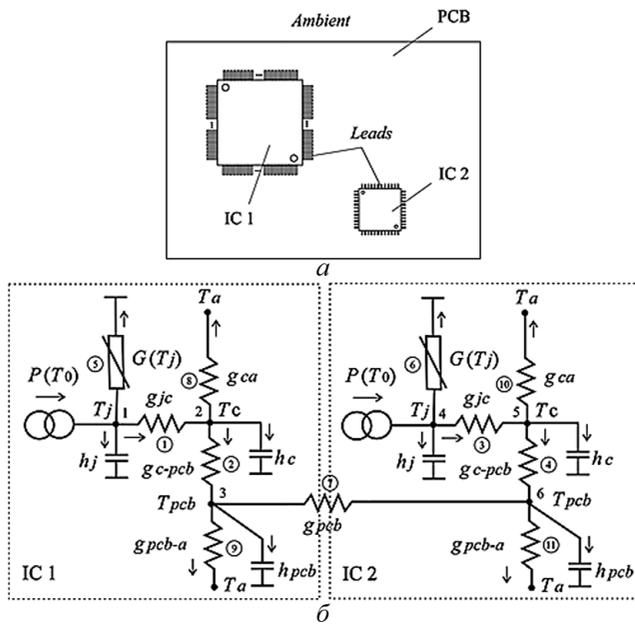


Рис. 4. Электронный модуль (а) и его тепловая модель (б). Микросхемы IC1 и IC2 установлены на многослойную печатную плату (PCB), j – кристалл микросхемы, с – корпус; Leads – выводы корпуса

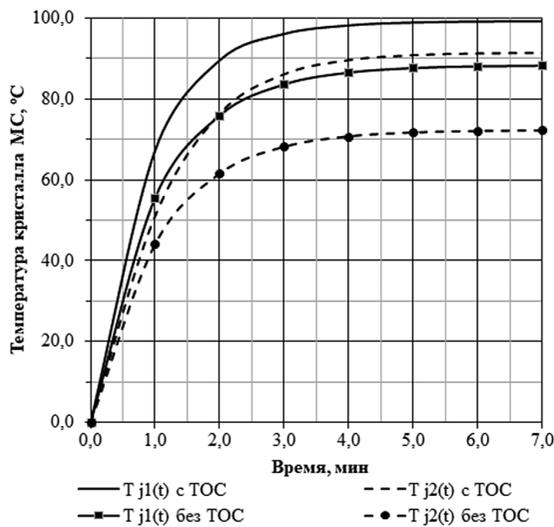


Рис. 5. Нестационарные температуры кристаллов микросхем IC1 ($T_{j1}(t)$) и IC2 ($T_{j2}(t)$), рассчитанные при учете и без учета воздействия тепловой обратной связи (ТОС)

Примем, что микросхемы IC1 и IC2 характеризуются следующими температурно-зависимыми мощностями потребления:

$$P_1(T_{j1}) = P_{01} + b(T_{j1} - T_0) + c(T_{j1} - T_0)^2,$$

$$P_2(T_{j2}) = P_{02} + P_{02} \left(1 - a^{T_{j2} - T_0} \right),$$

где T_{j1} , T_{j2} – температуры кристаллов микросхем IC1 и IC2; $P_{0k} = P_k(T_0)$, $k = 1, 2$ – мощности потребления микросхем IC1 и IC2 при темпера-

туре $T_0 = 273$ К; $a > 0$, $b > 0$, $c < 0$ – числовые коэффициенты. Причем если зависимость мощности $P_1(T_{j1})$ от температуры на начальном участке возрастает, приводя в микросхеме IC1 к положительной тепловой обратной связи, а затем убывает, так что тепловая обратная связь становится отрицательной, то мощность $P_2(T_{j2})$ монотонно увеличивается с ростом температуры, делая тепловую обратную связь в микросхеме IC2 положительной. В силу характера заданных температурных зависимостей мощностей потребления микросхем $P_1(T_{j1})$ и $P_2(T_{j2})$ величины схемных элементов $G(T_{j1})$ и $G(T_{j2})$, подключенных к тепловой модели электронного модуля для моделирования воздействия тепловой обратной связи (см. рис. 4), равны следующим выражениям:

- для IC1: $G(T_{j1}) = \left(b(T_{j1} - T_0) + c(T_{j1} - T_0)^2 \right) / T_{j1}$,
 $T_{j1} > 0$, $b > 0$, $c < 0$,
- для IC2: $G(T_{j2}) = P_{02} \left(1 - a^{T_{j2} - T_0} \right) / T_{j1}$,
 $T_{j2} > 0$, $a > 0$.

Мощности P_{01} и P_{02} , потребляемые при температуре T_0 , представлены на тепловой модели (рис. 4, б) в виде независимых источников потоков тепла заданной величины.

Тепловые процессы при воздействии тепловой обратной связи в рассматриваемом электронном модуле (см. рис. 4, а) рассчитывались посредством решения матричных уравнений (1). Результаты моделирования нестационарных температур кристаллов микросхем IC1 $T_{j1}(t)$ и IC2 $T_{j2}(t)$ при воздействии положительной и отрицательной тепловой обратной связи, а также при ее отсутствии приведены на рис. 5. Как следует из полученных зависимостей пренебрежение эффектом тепловой обратной связи приводит к существенным погрешностям расчета тепловых процессов в ЭС, а именно, температура кристалла микросхемы IC1 с учетом воздействия тепловой обратной связи отличается от температуры этого кристалла без ее учета на 12°C, а кристалла микросхемы IC2 – на 19°C.

На рис. 6 показаны установившиеся температуры кристаллов микросхем IC1 и IC2 как функции от расстояния между обеими микросхемами, выраженные через тепловое сопротивление растекания по многослойной печатной плате. Характер зависимостей рис. 6 свидетельствует о том,

что в рассматриваемом конкретном случае увеличение расстояния между микросхемами приводит к увеличению температуры кристалла IC1 при одновременном уменьшении температуры кристалла IC2. Такая зависимость легко объясняется: мощность тепловыделения микросхемы IC1 превосходит мощность микросхемы IC2, поэтому температура IC1 превосходит температуру IC2, что вызывает тепловой поток между обеими микросхемами, от IC1 к IC2. И чем ближе расстояние между ними, тем меньше будут различаться их температуры. При увеличении расстояния тепловое взаимодействие между обеими микросхемами ослабевает, и разность температуры между ними увеличивается.

Выводы

Интерактивное взаимодействие между тепловыми и электрическими процессами, протекающими в микросхемах и электронных системах с применением микросхем, обуславливает возникновение эффекта тепловой обратной связи. Тепловая обратная связь особенно сильно проявляется в полупроводниковых материалах, из которых изготавливаются кристаллы микросхем в силу сильной зависимости их физических параметров от температуры. Поэтому при тепловом проектировании микросхем и электронных систем необходимо моделировать электрические и тепловые процессы с учетом воздействия тепловой обратной связи. В противном случае, пренебрежение влиянием тепловой обратной связи может привести к ошибкам при проектировании и созданию неконкурентоспособных изделий электроники.

В статье предлагается метод моделирования эффекта тепловой обратной связи, представляющий собой использование подключаемого к узлам активных элементов тепловой модели схемного элемента в виде нелинейно зависящей от температуры тепловой проводимости. Знак проводимости зависит от знака тепловой обратной связи: для положительной тепловой обратной связи этот знак тепловой проводимости, моделирующей тепловую обратную связь на тепловой модели, будет отрицательным, а для отрицательной, наоборот – положительным. Разработанная модель тепловой обратной связи обладает гибкостью, позволяющей естественным образом включать ее как в уравнения математической модели электронных систем, так и в существующие про-

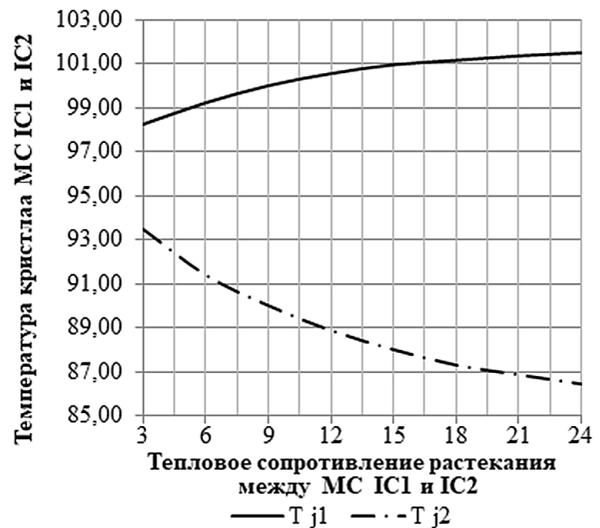


Рис. 6. Зависимости установившихся температур кристаллов микросхемы IC1 (T_{j1}) и IC2 (T_{j2}), рассчитанные при воздействии тепловой обратной связи, от теплового сопротивления растекания по многослойной печатной плате между микросхемами IC1 и IC2

граммные комплексы теплового моделирования микросхем и электронных систем.

Применение разработанной модели тепловой обратной связи рассмотрено на примере конкретной электронной системы, содержащей две микросхемы, находящиеся в тепловом взаимодействии между собой посредством теплопередачи по многослойной печатной плате, к которой обе микросхемы припаяны выводами своих корпусов. Проведено сравнение тепловых процессов, развивающихся в микросхеме как при наличии тепловой обратной связи, так и без нее. Показано существенное влияние, которое оказывает тепловая обратная связь на тепловые процессы электронной системы. Получены зависимости установившихся температур кристаллов микросхем в присутствии тепловой обратной связи от интенсивности теплового взаимодействия между обеими микросхемами, моделируемой тепловым сопротивлением растекания теплового потока по конструкции многослойной печатной платы. Аппроксимация подобных зависимостей достаточно простыми выражениями позволяет предложить метод для решения актуальной проблемы оптимизации размещения микросхем на плате по критериям снижения уровней температуры, уменьшения влияния тепловой обратной связи, при одновременной оптимизации трассировки токоведущих соединений и сигнальных проводников в многослойной печатной плате. Такая задача будет рассматриваться в дальнейших работах автора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мадера А. Г.** Расчет динамического режима полупроводниковых микросхем с учетом тепловой обратной связи // Микроэлектроника. 1982. Т. 11. № 2. С. 175–177.
2. **Мадера А. Г.** Моделирование теплообмена в технических системах. М.: Науч. фонд «Первая исслед. лаб. им. акад. В. А. Мельникова», 2005. 204 с.
3. **Сергеев В. А., Хадаков А. М.** Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 230 с.
4. **Чеканов А. Н.** Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры. М.: КноРус, 2012. 438 с.
5. **Samarchia V., Cappelluti F., Pirola M., Guerrieri S. D., Ghione G.** Self-consistent electrothermal modeling of class A, AB, and B power GaN HEMTs under modulated RF excitation // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2007. V. 55. N 9. P. 1824–1831.
6. **Tenbroek B. M., Lee M. S., Redman-White W., Bunyan R. J. T., Uren M. J.** Self-heating effects in SOI MOSFET's and their measurement by small signal conductance techniques // IEEE Trans. on Electron Devices. 1996. V. 43. N. 12. P. 2240–2248.
7. **Ellison G. N.** Thermal Computations for Electronics. Conductive, Radiative, and Convective Air Cooling. N.Y.: CRC Press, 2011. 416 p.
8. **Hnatec E. R.** Integrated Circuit Quality and Reliability. London, N.Y.: Taylor & Francis, 2005. 786 p.
9. **Kuuse M., Loikkanen M., Bognar Gy.** Theoretical investigation of feedback effects in low-power circuits // THER-INIC. Belgirate, Italy. 28–30 sept. 2005. P. 55–58.
10. **Мадера А. Г., Кандалов П. И.** Моделирование трехмерных температурных полей в электронных модулях // Программные продукты и системы. 2010. № 2. С. 36.
11. **Мадера А. Г., Кандалов П. И.** Матрично-топологический метод математического и компьютерного моделирования температурных полей в электронных модулях: программный комплекс STF-ElectronMod // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 34.
12. **Мадера А. Г.** Математическое моделирование интервально стохастических нестационарных нелинейных тепловых процессов в электронных системах // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 3. С. 126–136.

Thermal processes in electronic systems in conditions of thermal feedback effect impact

A. G. Madera

Scientific Research Institute for System Studies of Russia Academy of Sciences, Moscow
e-mail: agmprof@mail.ru

The article considers the effect of the thermal feedback occurring in electronic systems while functioning of integrated circuits, resistors, electro and radio components. Thermal feedback presents in all electronic systems, where operating parameters and power consumption depend on temperature, and temperature, in its turn, depends on the consumed power. Just the parameters interactive interdependence occurring herewith and returning new values of parameters and temperature through the feedback leads to the thermal feedback.

The thermal feedback may be either positive, when power consumption by the electronic circuit components increases with temperature growth, or negative, when consumed power decreases with temperature growth. The thermal feedback can drastically affect the workability and reliability an electronic circuit, and it presents a serious hindrance while creating competitive electronic circuits. While the positive thermal feedback may lead to the system parameters bounds violation, failures and burning-out, the negative feedback, on the contrary, has stabilizing effect on functional and thermal modes of the systems. The article analyzes conceptual sense of the thermal feedback and its impact on the thermal processes in electronic systems. A method for thermal feedback modeling based on introducing new temperature-dependent schematic elements into the system thermal model is proposed. Such thermal feedback model allows its inclusion into existing algorithms and effective software for electronic systems thermal design. The developed model application was considered on the example of real electronic system, and effect of the thermal feedback on the thermal processes developing in its components.

Keywords: electronic system, microcircuit, thermal feedback, temperature distribution, thermal model, mathematical model, modeling.

REFERENCES

1. **Madera A. G.** Raschet dinamicheskogo rezhima poluprovodnikovoykh mikroskhem s uchedom teplovoj obratnoy svyazi [Calculation of the dynamic mode of semiconductor chip with regard for the thermal feedback]. *Mikroelektronika –Microelectronics*, 1982, vol. 11, no. 2, pp. 175–177. In Russ.
2. **Madera A. G.** *Modelirovanie teploobmena v tekhnicheskikh sistemakh* [Modeling of heat transfer in technical

- systems]. Moscow: Publ. Nauch. fond «Pervaya issled. lab. im. akad. V.A. Mel'nikova», 2005. 204 p. In Russ.
3. **Sergeev V.A., Khadakov A.M.** *Nelinejnye teplovye modeli poluprovodnikovyx priborov* [Nonlinear thermal models of semiconductor devices]. Ul'yanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publ., 2012. 230 p. In Russ.
 4. **Chekanov A.N.** *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoj apparatury* [Calculations and the reliability assurance of electronic equipment]. Moscow, KnoRus Publ., 2012. 438 p. In Russ.
 5. **Camarchia V., Cappelluti F., Pirola M., Guerrieri S.D., Ghione G.** Self-consistent electrothermal modeling of class A, AB, and B power GaN HEMTs under modulated RF excitation. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2007, vol. 55, no. 9, pp. 1824–1831.
 6. **Tenbroek B.M., Lee M.S., Redman-White W., Bunyan R.J.T., Uren M.J.** Self-heating effects in SOI MOS-FET's and their measurement by small signal conductance techniques. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1996, vol. 43, no. 12, pp. 2240–2248.
 7. **Ellison G.N.** *Thermal Computations for Electronics. Conductive, Radiative, and Convective Air Cooling*. N.Y.: CRC Press, 2011. 416 p.
 8. **Hnatec E.R.** *Integrated Circuit Quality and Reliability*. London, N.Y.: Taylor & Francis, 2005. 786 p.
 9. **Kuuse M., Loikkanen M., Bogнар Gy.** Theoretical investigation of feedback effects in low-power circuits. *Proc. of THERINIC. Belgirate, Italy. 28–30 sept. 2005*. pp. 55–58.
 10. **Madera A.G., Kandalov P.I.** Modelirovanie trekhmernykh temperaturnykh polej v ehlektronnykh modulyakh [Modeling of 3D temperature fields in electronic modules]. *Programmnye produkty i sistemy – Software&System*, 2010, no. 2, p. 36. In Russ.
 11. **Madera A.G., Kandalov P.I.** Matrichno-topologicheskij metod matematicheskogo i komp'yuternogo modelirovaniya temperaturnykh polej v ehlektronnykh modulyakh: programmnyj kompleks STF-ElectronMod [Matrix-topological method of mathematical and computer modeling of temperature fields in electronic modules: software complex STF-ElectronMod]. *Programmnye produkty i sistemy – Software&System*, 2012, no. 4, p. 34. In Russ.
 12. **Madera A.G.** Matematicheskoe modelirovanie interval'no stokhasticheskikh nestatsionarnykh nelinejnykh teplovykh protsessov v ehlektronnykh sistemakh [Mathematical modeling of interval stochastic nonlinear transient thermal processes in electronic systems]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*. 2016, vol. 8, no. 3, pp. 126–136. In Russ.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ЧИТАТЕЛЕЙ

X Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «МОЛОДЁЖЬ И БУДУЩЕЕ АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКИ»

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) приглашает принять участие в ежегодном X Всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов «МОЛОДЁЖЬ И БУДУЩЕЕ АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКИ»

К участию приглашаются молодёжные коллективы, молодые учёные, специалисты, аспиранты, студенты, возраст которых на момент представления работы на конкурс не превышает 35 лет.

Конкурс проводится в 2 этапа:

1 этап конкурса – заочный, проводится в Московском авиационном институте.

2 этап пройдёт на форуме в рамках V Международной недели авиакосмических технологий «Aerospace Science Week» **20 ноября 2018 г.**

Для участия в конкурсе необходимо представить в ОРГКОМИТЕТ не позднее **30 сентября 2018 г.** следующие материалы:

– Заявку на участие в конкурсе, пройдя регистрацию на сайте <http://mforum.mai.ru/> и заполнить электронную форму в личном кабинете.

– Аннотацию конкурсной работы объемом не более 3-х страниц формата А4.

– Конкурсную работу, выполненную в виде статьи в соответствии с требованиями журнала «Труды МАИ» (<http://trudymai.ru/demand.php>) или «Вестник Московского авиационного института» (<http://vestnikmai.ru/demand.php>).

– Экспертное заключение о возможности публикации работы в открытой печати.

По желанию участников конкурсные работы и проекты могут быть дополнены сканированными копиями актов о внедрении, патентов, отзывов и рецензий ведущих учёных и специалистов.

Победители будут награждены дипломами, специальными призами и денежными премиями, работы победителей будут опубликованы в научных изданиях Перечня ВАК. Аннотации представленных работ будут опубликованы в отдельном сборнике. Участие в конкурсе бесплатное.

E-mail: mforum@mai.ru
URL: <http://mforum.mai.ru/>